



VON DER FORSCHUNG ZUR PRAXIS · 23. SEPTEMBER 2026

„Allein – aber nicht isoliert“

Koordinierte Autonomie in der
dezentralen Klimatisierung durch Multi-
AI-Agenten

CampUS · EKUS · HeatVentCon

INTELLIGENTE GEBÄUDE FÜR DIE ZUKUNFT

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

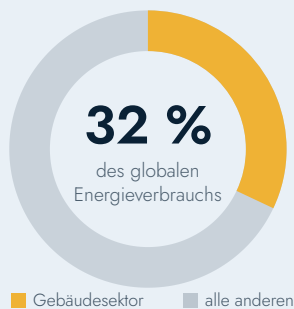
Unsere Agenda

Die Reise zum intelligenten Gebäude

- **Die Herausforderung.** Warum traditionelle Gebäude an ihre Grenzen stoßen.
- **Die Forschungsreise.** Ein Referenzgebäude, drei Regelungsarten gleichzeitig — Energie und Akzeptanz gemessen.
- **Die Erkenntnisse.** Was die Einzelraumregelung leistet, und was sie die Nutzenden kostet.
- **Der Schwarm.** Autonome Räume, geteilte Blaupausen, ein beobachtender Leitstand.
- **Die Umsetzung.** TEFFI in der Praxis.
- **Der Ausblick.** Normen, Netz und der nächste Schritt.



Gebäude sind der größte Einzelposten



32 %
des globalen Energieverbrauchs

34 %
der globalen CO₂-Emissionen

Der Hauptgrund ist nicht fehlende Technik, sondern Ineffizienz: Heizung, Kühlung und Lüftung wissen nichts voneinander — und nichts davon, ob überhaupt jemand im Raum ist.

UN Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction: Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025 („Not just another brick in the wall“). Die neuere Ausgabe 2025/2026 nennt rund 37 % der globalen CO₂-Emissionen.

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

IV UMSETZUNG

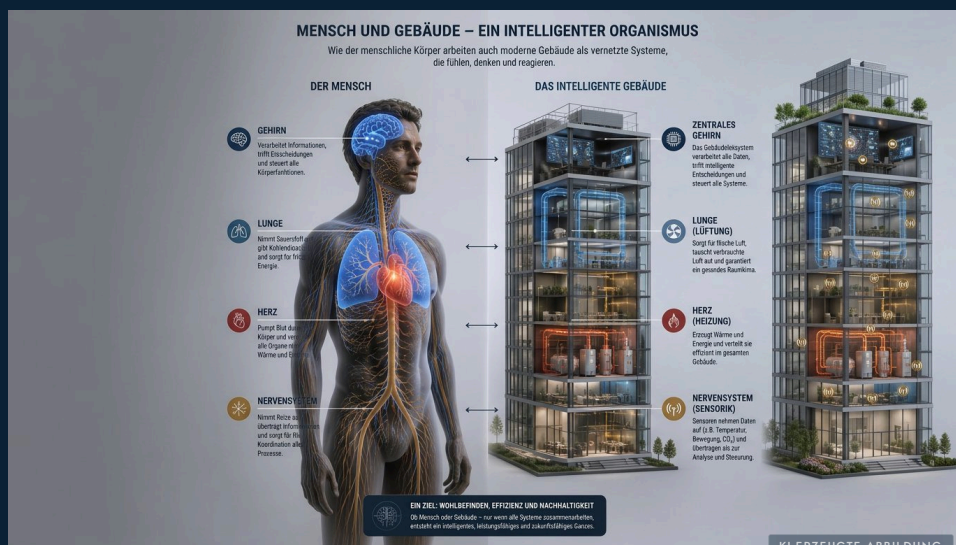
V AUSBLICK

3 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

DAS BILD, DAS WIR ALLE IM KOPF HABEN

Wir brauchen intelligente Gebäude. Und so sehen wir sie.



Gehirn, Herz, Lunge, Nervensystem — die Analogie ist eingängig, und genau so wird Gebäudeautomation seit dreißig Jahren erklärt und gebaut. Halten Sie dieses Bild fest. Wir kommen nach den Messergebnissen darauf zurück.

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

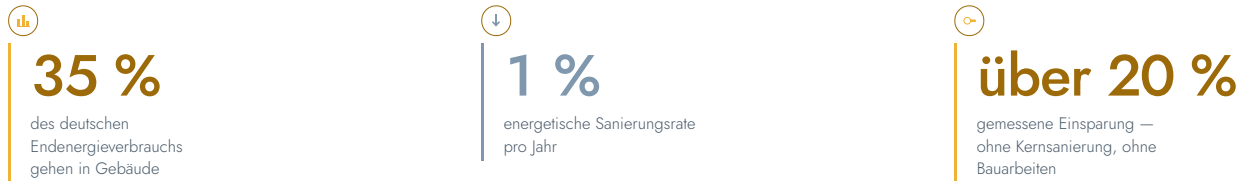
IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

4 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Der Bestand entscheidet, ob 2045 erreichbar ist.



Bei dieser Sanierungsrate dauert der Bestand hundert Jahre. Was wirkt, muss **ohne Kernsanierung** wirken — und die Gebäudeautomation ist der einzige Hebel, der heute greift.

Anteil des Gebäudesektors am deutschen Endenergieverbrauch und energetische Sanierungsrate: Angaben nach dena-Gebäudereport. Die Einsparung ist der eigene Messwert aus EKUS hoch i, siehe Teil I.

DIE THESE

Dezentrale Intelligenz bedeutet nicht isolierte Einzelregelung, sondern **koordinierte Autonomie**.

Jeder Raum entscheidet selbst. Kein Raum entscheidet allein.

Jeder Raum regelt selbst. Kein Raum regelt **gegen** **den anderen.**

- 🔑 **Entscheidet selbst** heißt: Der Raum ist seine eigene Regelung — autark, auf den Informationen seines eigenen Systems.
- 📄 **Nicht allein** heißt: Alle Räume nutzen dieselbe Intelligenz und dieselbe Bibliothek. Deshalb entsteht aus Autarkie kein Gegeneinander, sondern bedarfsgerechtes Miteinander.
- 👁️ **Und vollständig transparent:** Alles, was im Raum passiert, fließt zum Leitstand — der daraus die nächste Blaupause bildet.

Teil I Die Forschungsreise

Ein Referenzgebäude, drei Regelungsarten gleichzeitig —
Energie und Akzeptanz.

Drei Projekte, eine gemeinsame Frage

PROJEKT	LAUFZEIT	TRÄGER	SCHWERPUNKT
CampUSi	03/2021 — 06/2024	MWK Baden-Württemberg	Reallabor Campus Vaihingen. Aufbau der Steuerungsplattform im IER-Gebäude, Realexperiment „Intelligente Steuerung und interaktives Stakeholder-Feedback“
EKUSi	seit 07/2024	MWK Baden-Württemberg	Nachfolger mit Fokus Einzelraumbene : Steuerungsexperiment über die Heizperiode 2024/2025
HeatVentCon	11/2021 — 12/2024	IGF 01IF22051N	Systemübergreifende Regelstrategien Heizung und Lüftung. TRNSYS-Kosimulation und Hardware-in-the-Loop

Beteiligte Institute

IER (Verbundkoordination), IGTE, ZIRIUS, IWB und Green Office der Universität Stuttgart; FG HLK Stuttgart bei HeatVentCon.

Praxispartner

Tecomon GmbH lieferte Sensorik, Aktorik und Unterstützung beim Monitoring-Instrument — und ermöglichte die Übertragung auf ein zweites Universitätsgebäude (PWR 7).

Und ein privater Vermieter

Der Eigentümer der Heßbrühlstraße 49a brachte über 40.000 € Investitionsmittel ein und ließ Wärmemengenzähler je Etage installieren. Ohne ihn gäbe es diese Messung nicht.

DIE FORSCHUNGSFRAGE

Welcher Einspareffekt ist durch intelligente Technologien erreichbar — ohne den Komfort zu beeinträchtigen?

**Energie**

Wie viel Wärme spart eine präsenzzabhängige Regelung im realen Bürobetrieb, witterungsbereinigt?

**Akzeptanz**

Wie bewerten die Raumnutzenden dieselbe Regelung — und zu welchem Zeitpunkt des Tages?

**Parametrierung**

Welche Vorlauftemperatur und welche Aufheizzeit bringen das beste Verhältnis aus beidem?

Beide Teile der Frage sind gemeinsam gemessen worden. Das macht das Ergebnis unbequemer — und ehrlicher.

DAS REFERENZGEBÄUDE

IER-Institut Stuttgart, Baujahr 1966

Gebäudetyp	Bürogebäude, seither saniert: doppelt verglaste Fenster, Außendämmung
Geschosse	3 Obergeschosse, vergleichbar genutzt
Wärmeerzeugung	gasbetriebener Brennwertkessel, zentral, Radiatoren im Raum
Wärme laut Energieausweis	81 kWh/m²a
Strom laut Energieausweis	45 kWh/m²a
Messtechnik	je Stockwerk ein geeichter Wärmemengenzähler



Ullmann et al. (2025), Symposium Zukunft Wärme, Abschnitt 1. Die frühere Angabe „Radiatoren und Wärmepumpe“ war falsch — die Wärmepumpe wurde erst nach dem Experiment über den Vermieter angestoßen. Bildmotiv aus dem eigenen Bildbestand, nicht das IER-Gebäude selbst.

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

11 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

TECHNISCHES NERVENSYSTEM — DER HARDWARE-AUFBAU

Vier Komponenten pro Raum. Keine einzige Leitung.



Präsenzmelder

Infrarot-Bewegungsmelder. Erkennt anonymisierte Anwesenheit, nicht Personen. Solarzelle, batterieless.



Multisensor

Temperatur, Helligkeit und Luftfeuchte. Sendet im 5-Minuten-Intervall.



Heizkörperstellantrieb

Intelligentes Thermostat, am Ventil als Zweipunktregler. Energy Harvesting am Heizkörper.



Fensterkontakt

Lüftungserkennung. Solarzelle, batterieless.

Das virtuelle Raumthermostat

Alle Geräte eines Raums werden digital zu einem **digitalen Zwilling** des Raumzustands vernetzt. Dort werden die Sensorwerte verarbeitet und die berechneten Temperaturvorgaben auf die Thermostate gespiegelt. Umsetzung mit NodeRed, Datenhaltung in InfluxDB.

Und der Sollwert bleibt beim Nutzer

In **allen** Regelungsvarianten konnten die Raumnutzenden ihre persönliche Soll-Raumtemperatur jederzeit selbst einstellen. Variiert wurde nicht der Sollwert, sondern **wann** er angefahren wird.

Elitako FKSSV (Thermostat), FBH55ESB (Bewegungsmelder), FMMS44SB (Multisensor) · Funkstandard EnOcean, ISO/IEC 14543-3-10

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

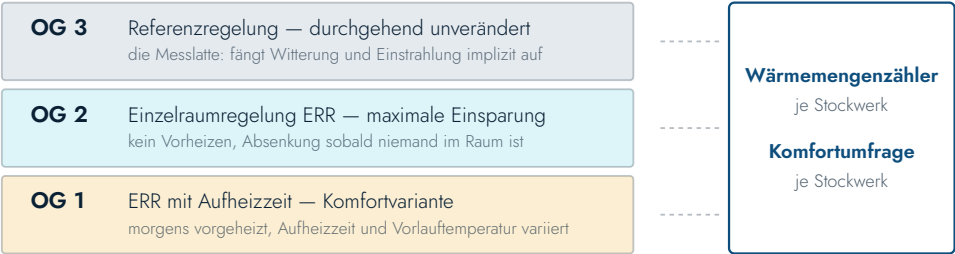
IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

12 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Ein Gebäude, drei Regelungsarten — gleichzeitig



Das Gebäude ist der Prüfstand: Weil alle drei Strategien zur selben Zeit unter derselben Witterung laufen, lässt sich jede an derselben Messlatte vergleichen.

REALISIERTE REGELUNGSARTEN

Was genau verglichen wurde

🕒

REF · Referenzregelung

Alle Räume werden an jedem Wochentag von **05:00 bis 18:00 Uhr** auf die von den Nutzenden eingestellte Soll-Temperatur geheizt — unabhängig davon, ob jemand da ist.

👤

ERR · Einzelraumregelung

Jeder Raum einzeln auf den eingestellten Sollwert. Wird **15 Minuten keine Bewegung** erkannt, sinkt der Sollwert auf 7,5 °C. Wiederaufnahme sofort bei der ersten Bewegung.

🕒

ERR+ · mit Aufheizzeit

Wie ERR, aber die Räume werden **vor 09:00 Uhr** auf den Sollwert vorgeheizt — damit niemand in einen kalten Raum kommt. Die Aufheizzeit variiert mit der Vorlauftemperatur.

VARIANTE	VORLAUFTEMPERATUR	AUFHEIZZEIT OG 1	ERWARTUNG
ERR	50 °C	keine	maximale Einsparung, geringster Komfort
ERR+	50 °C	90 min	Komfortgewinn, Einsparung sinkt
ERR+/60	60 °C	60 min	schnelleres Aufheizen, kürzere Vorlaufzeit
ERR+/70	70 °C	30 min	noch kürzer — der Grenzfall

I FORSCHUNGSREISEII ERKENNTNISSEIII DER SCHWARMIV UMSETZUNGV AUSBLICK14 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Wer wann wie geregelt wurde

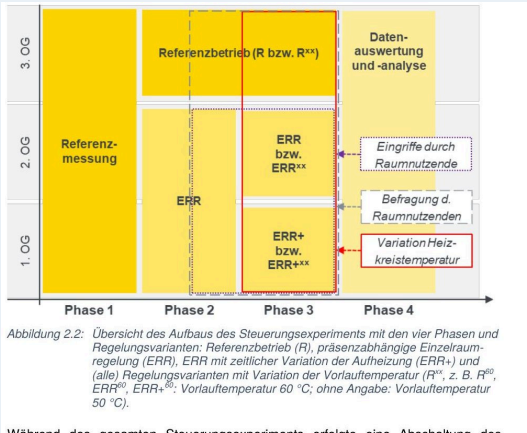


Abbildung 2.2 aus: Ullmann, Helf, Lierhammer, Häbig, Eltrop, Leger, Drück, Hufendiek (2025): Ergebnisse des Einsatzes intelligenter Technologien zur Verringerung des Wärmeverbrauchs eines Bürogebäudes. Symposium Zukunft Wärme, 20.–22. Mai 2025, Bad Staffelstein, Seite 4. DOI 10.18419/opus-17951

ALLE MESSWERTE · WITTERUNGSBEREINIGT

Die vollständige Ergebnistabelle

OG 1	Art / Regelung	REF	ERR	REF	ERR+/90	ERR+60	ERR+30	ERR
OG 2	Art / Regelung	REF	ERR	REF	ERR	ERR	ERR	ERR
OG 3	Art / Regelung	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
θ _{Vorlauf}	°C	50	50	50	50	60	70	50
Bezeichnung	-	REF 1	ERR 1	REF 2	ERR+	ERR+/60	ERR+/70	ERR 2
Q _{b,OG3}	kWh/d	81.2	96.1	110.9	91.8	92.3	90.2	58.0
Q _{b,OG2}	kWh/d	50.1	47.9	69.2	51.8	36.0	30.3	29.3
Q _{b,OG1}	kWh/d	56.2	43.6	70.4	56.4	45.0	42.4	39.4
Q _{b,ges(ber.)}	kWh/d	187.5	187.6	250.6	200.0	173.3	162.9	126.8
ΔQ _{b,OG3}	%	-	18.3	36.6	13.0	13.7	11.1	-28.6
T _{m,E03}	°C	19.97	19.36	20.38	19.59	20.68	21.23	21.98
ΔQ _{b,OG2}	%	-	-4.3	38.2	3.4	-28.2	-39.5	-41.4
T _{m,E02}	°C	20.00	18.86	20.38	19.21	20.06	20.58	22.02
ΔR _{2/3}	%	-	-19.07	1.17	-8.45	-36.84	-45.56	-17.93
ΔQ _{b,OG1}	%	-	-22.4	25.3	0.4	-19.9	-24.6	-29.8
T _{m,E01}	°C	20.39	19.04	20.96	19.94	20.52	21.27	22.58
ΔR _{1/3}	%	-	-34.44	-8.30	-11.16	-29.57	-32.09	-1.76
ΔQ _{b,ges}	%	-	0.1	33.6	6.6	-7.6	-13.1	-32.4
GTZ _{ges}	GTZ/d	15.2	15.5	15.5	16.6	14.4	11.7	9.2

Q_b: witterungs-
bereinigter
Wärmeverbrauch

T_m: mittlere
Stockwerks-
temperatur

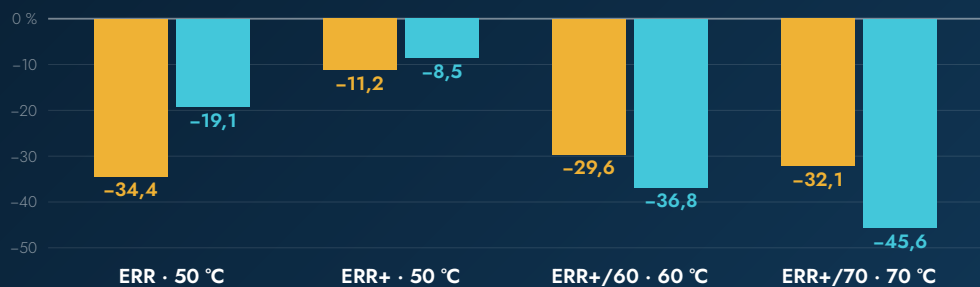
R: Wärmever-
brauchsverhältnis

GTZ: Gradtag-
zahl

G: Einstrahlung

Aus: EKUS hoch i, Präsentation Aktionstag AG Intelligente Steuerung IER, 21.10.2025, Seite 39. Witterungsbereinigung über Gradtagzahlen nach VDI 2067 Blatt 1, Heizgrenztemperatur 15 °C, Referenz ist die Referenzmessung REF 1.

Die Kennzahl ist das Verbrauchsverhältnis zum Referenzstockwerk



■ OG 1 · Komfortvariante mit Aufheizzeit ■ OG 2 · Einsparvariante ohne Aufheizzeit

Veränderung des Verbrauchsverhältnisses gegenüber der Referenzmessung

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

17 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Das Einsparpotenzial durch Präsenzabhängigkeit ist nachgewiesen

über 20 %

Einsparung beim witterungsbereinigten Wärmeverbrauch

bis zu 40 %

Reduktion bezogen auf die Verbrauchsverhältnisse

deutlich

sichtbarer Einfluss der Anwesenheit auf den Wärmeverbrauch

Die Anwesenheit schlägt direkt auf den Verbrauch durch — an Tagen mit geringer Belegung sinkt er messbar. Genau das war die Hypothese.

Eine Störgröße, die noch untersucht wird

Der Verbrauch des Referenzstockwerks OG 3 liegt in allen Phasen über der Referenzmessung. Die Projekte führen das auf einen **Wärmestrom von OG 3 nach OG 2** zurück, der durch die Temperaturdifferenz entsteht, und bezeichnen ihn als schwer quantifizierbar. Er wird derzeit über ein Korrelationsmodell aus Temperaturdifferenz und Einstrahlung erfasst.

Höhere Vorlauftemperatur mit kürzerer Aufheizzeit kann vorteilhaft sein



Was die Zahlen zeigen

Im Einsparstockwerk OG 2 verbessert sich das Verbrauchsverhältnis von –19,1 % bei 50 °C auf –36,8 % bei 60 °C und –45,6 % bei 70 °C. Der Bericht formuliert es vorsichtig: Für eine präsenzabhängige Regelung **scheint** eine höhere Vorlauftemperatur mit kürzeren Aufheizzeiten einen Vorteil bieten zu können.

Was in den Zahlen nicht enthalten ist

Höhere Vorlauftemperaturen bedeuten größere Verluste in den Verteilungen und einen schlechteren Nutzungsgrad des Brennwertsessels. Gemessen wurde bei der Einspeisung in die Heizkreise — diese beiden Effekte sind **nicht berücksichtigt**. Bei einer Wärmepumpe wäre der Effekt vermutlich umgekehrt.

DIE ANDERE HÄLFTE DER FRAGE · 391 UMFRAGEN

Große Einsparung geht deutlich zu Lasten der Nutzenden

OG 2 · ERR ohne Aufheizzeit

Vormittags wird die Raumtemperatur als etwas kälter bewertet als im Referenzstockwerk, und in den Kommentaren heißt es häufig, es sei zu kalt. Nach der Aufheizphase fallen die Bewertungen positiver aus.

Über den ganzen Tag: Einsparung bei einer Bewertung ähnlich zur Referenz — aber merkbare Einschränkungen am Morgen.

OG 1 · ERR+ mit Aufheizzeit

Wird vormittags **und** über den ganzen Tag deutlich kälter bewertet als die Referenz — und sogar kälter als OG 2, obwohl dort gar nicht vorgeheizt wurde.

Ergebnis: Deutliche Komforteinbußen bereits bei einer Verkürzung der morgendlichen Aufheizzeit auf 90 Minuten. Und das bei geringerer Einsparung als OG 2.

Was die Aussagekraft begrenzt

In OG 1 und OG 2 nahmen nur wenige Personen teil, die Ergebnisse sind dadurch von Einzelpersonen geprägt. ERR+/70, REF 2 und ERR 2 sind nicht repräsentativ. Umfrageergebnisse lassen sich nicht sinnvoll von Außeneinflüssen bereinigen.

OG 3 erwies sich als gute Referenz: viele Teilnehmende, regelmäßig ausgefüllt.

Die Bewertung des Raumkomforts korreliert stark mit der Raumtemperatur. Und die Einschränkungen treffen **besonders die Personen mit typischem Antwortmuster** — also die, deren Empfinden sich überhaupt vorhersagen lässt.

Wie stellt man einzelne Personen zufrieden, **ohne dafür das ganze Stockwerk zu heizen?**

Das Steuerungsexperiment hat Regelungsarten **je Stockwerk** verglichen. Die Menschen sitzen aber in Räumen — und empfinden einzeln.

Offene Frage aus der Komfortauswertung, EKUS hoch i, Aktionstag 21.10.2025

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

21 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

BEVOR SIE DIESEN ZAHLEN GLAUBEN

Was zu einer ehrlichen Messung gehört

Witterungsbereinigung: ja

Über Gradtagzahlen nach VDI 2067 Blatt 1, Heizgrenztemperatur 15 °C, Referenz ist die Referenzmessung. Die Bereinigung erfasst aber **nur die Außentemperatur** — nicht die Einstrahlung. Deshalb ist das Verbrauchsverhältnis die belastbarere Kennzahl.

Referenzstockwerk statt Modell

OG 3 lief durchgehend unverändert. Das ist der Grund, warum die Ergebnisse überhaupt vergleichbar sind — und gleichzeitig die Ursache des Wärmestroms zwischen den Etagen.

Was die Präsenzerkennung kann

Der Bewegungsmelder liefert 1 oder 0. Wie viele Personen im Raum sind, ist daraus nicht ableitbar. Anwesenheitswerte sind Tagesmittel von 7 bis 19 Uhr; die Raumbelastung ist der Anteil der Räume mit mindestens einer Erfassung am Tag.

Was wir nicht zeigen können

Ein Gebäude, eine Heizperiode, ein Klima, ein Erzeuger. Wenige Umfrageteilnehmende je Stockwerk. Die Trennung von Vorlauftemperatur und Aufheizzeit ist offen, weil beides gemeinsam variiert wurde.

Teil II

Die Erkenntnisse

Was dezentrale Regelung wirklich leistet — und was sie dafür braucht.

DIE ERKENNTNISSE (1 / 2)

Dezentrale Steuerung funktioniert — aber nur gemeinsam

Beweis: Einzelraumregelung ist der Zentralregelung auf der Etage klar überlegen.

Bedingung: Sie muss das ganze Gebäude erfassen, sonst verschiebt sie nur Last.

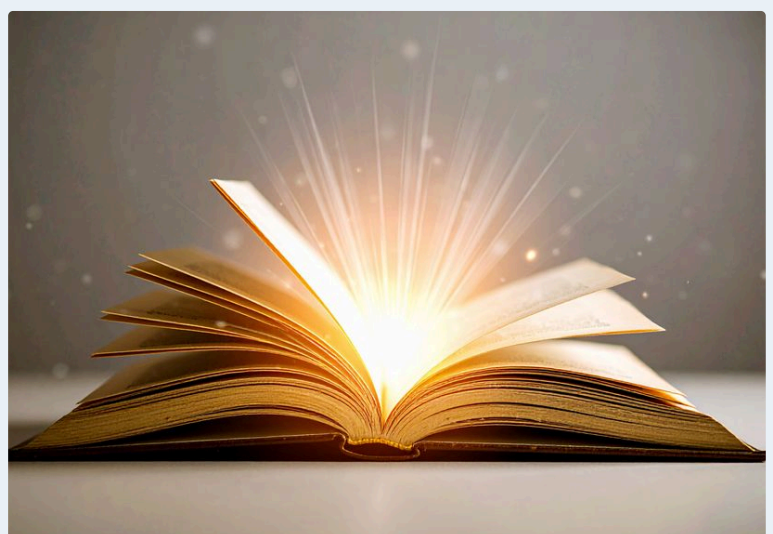
Resultat: 20 bis 28 % je Etage, 8 bis 13 % aufs Gebäude — mit angepasster Vorlauftemperatur.

Zentrale Systeme

- Ein Thermostat für alle
- Keine Raumindividualität
- Über- und Unterheizung unvermeidbar
- Hohe Investitionskosten

Dezentrale Systeme

- Raumweise Steuerung
- Präsenzgesteuert
- Optimal angepasst
- Plug & Play nachrüstbar



Etagenweise Sanierung ist möglich — mit einer Einschränkung

Jahr 1 OG 1 nachrüsten

Installation in ein bis zwei Tagen. Erste eigene Messwerte nach einer Heizperiode.

Jahr 2 OG 2 nachrüsten

Die Einsparung der ersten Etage finanziert die zweite mit.

Jahr 3 OG 3 nachrüsten

Erst jetzt ist die Lastverschiebung aufgelöst und die volle Gebäudeeinsparung erreichbar.

Der Altbestandsvorteil bleibt: keine Kernsanierung, keine Bauarbeiten, teilbare Investition.

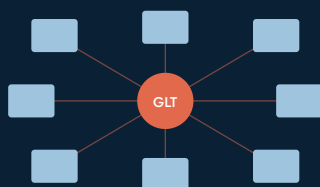
Aber sagen Sie es dazu

Solange nur ein Teil des Gebäudes geregelt ist, heizen die unregulierten Zonen einen Teil der Einsparung wieder mit. Der wirtschaftliche Nutzen entsteht etagenweise, der volle energetische Nutzen erst am Ende.

DER DENKFEHLER

Das Gebäude braucht kein Gehirn. Der Körper hat auch keines dafür.

+ Die alte Erzählung



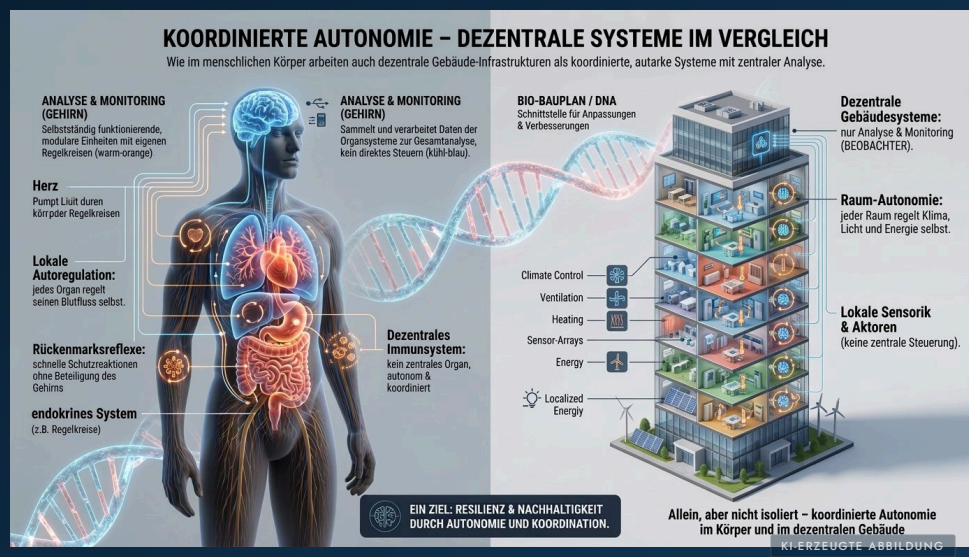
„Herz, Lunge, Nervensystem — es fehlt nur das zentrale Gehirn.“ Jede Entscheidung läuft durch die Mitte. Fällt die Mitte aus, fällt alles aus.

Was im Körper tatsächlich passiert

- Lokale Autoregulation.** Jedes Organ regelt seine Durchblutung selbst — der Kreislauf liefert nur Druck.
- Rückenmarksreflexe** laufen ohne jede Gehirnbeteiligung.
- Das Immunsystem** hat überhaupt keine Zentrale und ist trotzdem koordiniert.

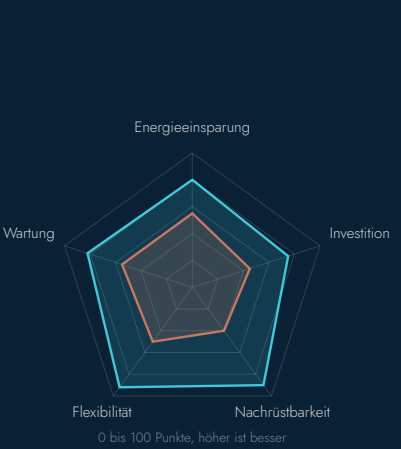
Der Körper ist selbst ein Schwarm autonomer Teilsysteme. Wir haben nicht die falsche Metapher gewählt — wir haben sie auf das Gehirn verkürzt und daraus die Gebäudeleittechnik abgeleitet.

So müsste das Bild eigentlich aussehen.



Unsere Metapher war nicht falsch — sie war verkürzt. Der Körper hat neben dem Gehirn zahlreiche autonome Systeme: lokale Autoregulation der Organe, Rückenmarksreflexe ohne Gehirnbeteiligung, ein Immunsystem ganz ohne Zentrale, endokrine Regelkreise. Das Gehirn analysiert und überwacht — es steuert nicht jeden Blutfluss.

Dezentrale vs. zentrale Intelligenz



	Zentrale Systeme	Dezentrale Systeme
EIGENSCHAFT	ZENTRAL	DEZENTRAL
Regelgranularität	Gebäude oder Strang	einzelner Raum
Nachrüstung im Bestand	Leitungen, Bauarbeiten	funkbasiert, Stunden
Investition	hoch, unteilbar	teilbar, 500–700 € je Raum
Änderungen im Betrieb	Reparametrierung nötig	lokal, ohne Gesamtmodell
Ausfall der Zentrale	Totalausfall	Räume laufen weiter
Globale Optimierung	systembedingt stärker	braucht Abstimmung

Die letzte Zeile gehört dazu. Bei gebäudeweiten Sequenzen und Erzeugerbetrieb ist die Zentrale im Vorteil — genau dort setzt Teil III an.

KERNAUSSAGE

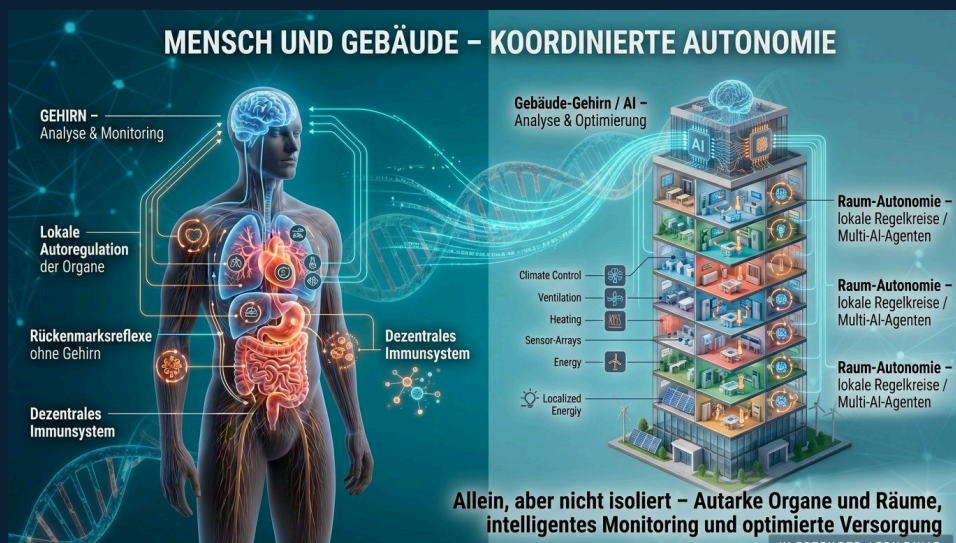
Dezentrale Intelligenz ist keine isolierte Einzel- regelung.

Sie ist **koordinierte Autonomie** — und ohne die Koordination bleibt von der Einsparung nichts übrig.

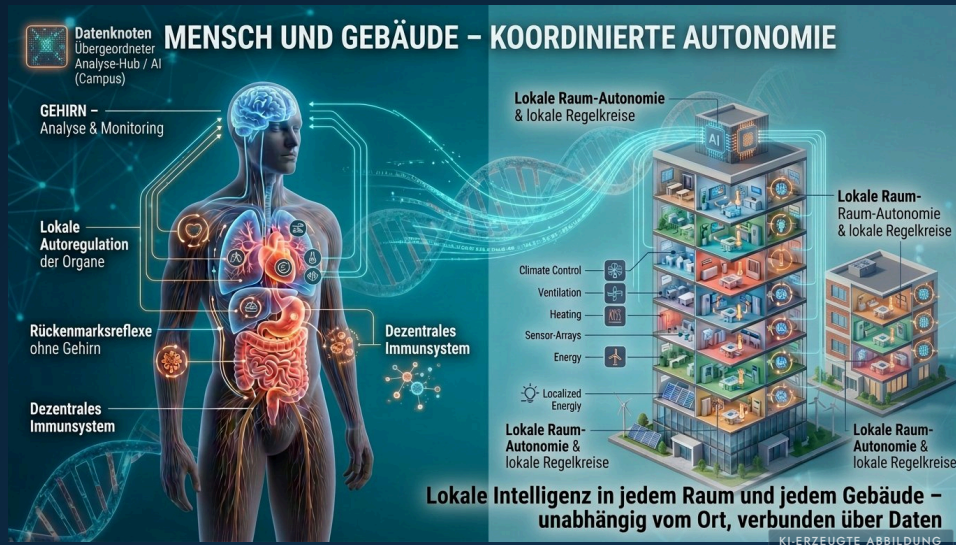


ERSTE STUFE · DAS EINZELNE GEBÄUDE

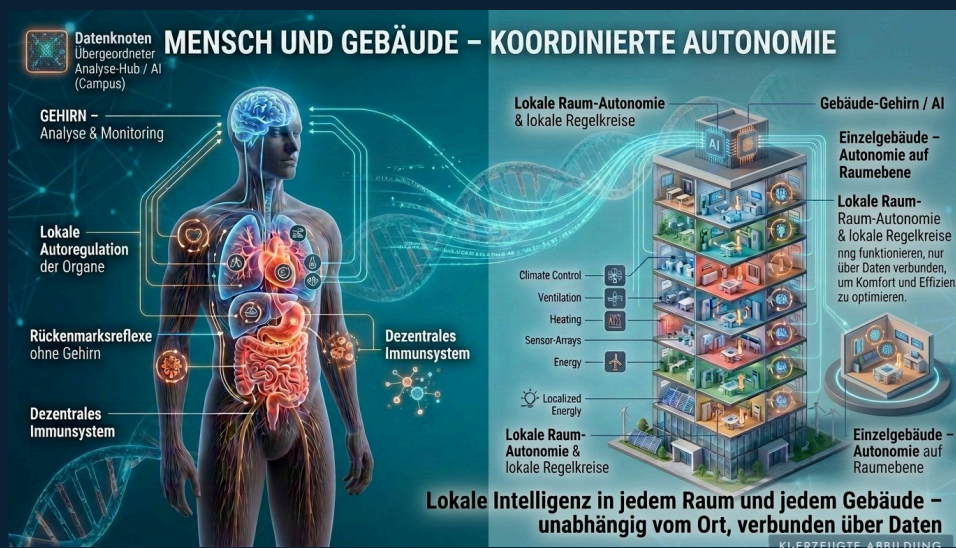
Jeder Raum ein eigener Regelkreis — analysiert von einer gemeinsamen Instanz.



Lokale Intelligenz in jedem Raum und jedem Gebäude
— unabhängig vom Ort, verbunden über Daten.



Autonomie auf Raumebene, Analyse über den gesamten Campus.



Teil III

Der Schwarm

Autonome Räume, geteilte Blaupausen, ein Leitstand der zusieht.

DIE ABGRENZUNG

Der Agent regelt selbst — auf dem, was sein eigenes System sieht

	GERÄT · AM VENTIL	RAUMAGENT · EIGENSTÄNDIGE REGELUNG
Verfahren	Zweipunktregler, auf den Sollwert	vollständiger Regelkreis: wahrnehmen, entscheiden, stellen
Informationsbasis	Istwert dieses Heizkörpers	nur das eigene System — Präsenz, Fenster, Multisensor, Belegungsmuster dieses Raums
Eingriff von außen	Sollwert vom Agenten	keiner — kein Befehl, kein Gesamtmodell, kein Laufzeit-Eingriff
Zeitskala	Sekunden	Minuten
Lernen	nein	ja, aus der beobachteten Nutzung dieses Raums

Autark heißt: er entscheidet allein

Der Agent ist kein Sollwertgeber für eine fremde Regelung. Er **ist** die Regelung seines Raums — und arbeitet dabei ausschließlich auf den aus seiner Sicht isolierten Informationen, die ihm sein eigenes System liefert.

Und was unverändert bleibt

Frostschutz, Brandfall und Not-Aus bleiben hartverdrahtet unterhalb des Agenten. An diesem Teil der Anlage ändert sich nichts, und er ist nie agentisch.

Kongruenz statt Verhandlung

Die naheliegende Sorge lautet: Wenn jeder Raum autonom regelt, regeln sie gegeneinander. Das wäre richtig, wenn jeder Raum eine **andere** Logik hätte.

Sie haben aber alle **dieselbe Intelligenz** und greifen auf **dieselbe Bibliothek** zurück. Gleiche Regeln auf gleichartige Situationen angewandt ergeben deckungsgleiches Verhalten — ohne dass ein Raum dem anderen etwas mitteilen muss.

Genau das ist das Prinzip im Schwarm: Kein Tier verhandelt seine Absicht. Alle folgen denselben lokalen Regeln, und daraus entsteht Kohärenz.

verschiedene Logiken



jeder zieht anders
→ Gegeneinander

gleiche Logik



alle nach denselben Regeln
→ Miteinander

DIE MECHANIK

Das Medium ist die Physik. Der Grund für die Einigkeit ist die Bibliothek.



Das gemeinsame Medium

Rücklauftemperatur, Differenzdruck und die Verteilung der Ventilstellungen sind bereits ein geteiltes Signal. Genau darüber hat sich in unserer Messung OG 3 mit OG 2 „unterhalten“ — nur ungewollt.



Die Nachbarschaft

Abgestimmt wird mit thermischen Nachbarn: angrenzende Zone, gleicher Strang, gleiche Fassade. Nicht mit 400 Räumen. Deshalb bleibt der Aufwand je Raum konstant.



Die geteilte Blaupause

Was ein Raumtyp im Mittel braucht, steckt in einer Referenzparametrierung. Der Agent startet damit und justiert von dort aus nach — kein Kaltstart, kein Gebäudemodell.

Was unsere Messung dazu beigetragen hat

Der Wärmestrom von OG 3 nach OG 2 war im Experiment eine Störgröße — aber er zeigt, dass die thermische Kopplung zwischen Zonen real ist und heute niemand sie nutzt. Ein Agent, der den Zustand seiner Nachbarfläche mitliest, sieht diesen Effekt. Eine Stockwerksstrategie kann ihn nicht sehen.

Jede Ebene ist für sich sicher — und keine kann die darunter aushebeln.

EBENE	AUFGABE	ZEITSKALA	VERHALTEN IM FEHLERFALL
L0 · Sicherheit	Frostschutz, Brandfall, Not-Aus	Millisekunden	hartverdrahtet, nie agentisch
L1 · Gerät	Zweipunktregler am Ventil	Sekunden	hält den letzten Sollwert, überlebt jeden Netzausfall
L2 · Raumagent	regelt den Raum eigenständig — Präsenz, Prognose, Selbstjustierung	Minuten	fällt aus → L1 hält, der Raum bleibt betriebsfähig
L3 · Leitstand	Beobachten, protokollieren, analysieren	Stunden	greift ohnehin nicht ein — Ausfall bleibt folgenlos
L4 · Blaupausen	Referenzparametrierung je Raumtyp	Monate	offline, versioniert — ein Update fällt aus, nichts passiert

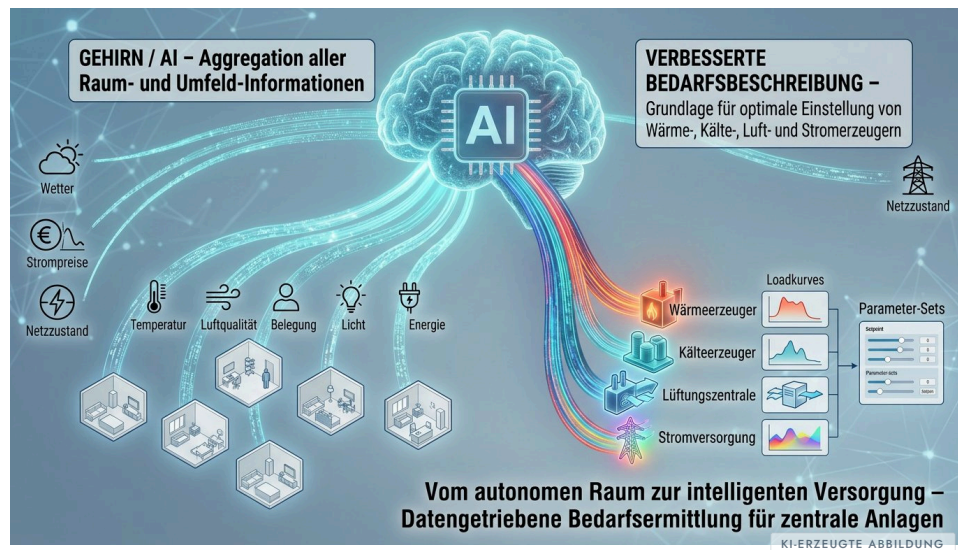
Sicherheit entsteht hier nicht dadurch, dass eine Zentrale alles kontrolliert, sondern dadurch, dass jede Ebene für sich funktioniert. Keine Ebene kann in die darunterliegende eingreifen. Fällt eine aus, trägt die nächste — und was sicherheitsrelevant ist, wird nie verhandelt.

DER KERN DER ARCHITEKTUR

Informationen fließen nach oben. Nach unten fließen Blaupausen und Anlagenparameter.



Vom autonomen Raum zur intelligenten Versorgung



Der Leitstand aggregiert, was die Räume ohnehin melden, und ergänzt es um Wetter, Netzzustand und Preise. Daraus entsteht keine Steuerung, sondern eine **verbesserte Bedarfsbeschreibung** — und aus dieser die Parametersätze für Wärme-, Kälte-, Luft- und Stromerzeugung.

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

39 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

DIE DRITTE WIRKUNG · ÜBER DIE REGELUNG HINAUS

Aus dem Betrieb wird eine Leitlinie für das Gebäude selbst



Richtwerte für die Anlage

Welche Vorlauftemperatur trägt den tatsächlichen Bedarf? Wann lohnt Absenkung, wann kostet sie mehr, als sie spart? Wie groß ist die real abgerufene Leistung gegenüber der ausgelegten? Aus den Verläufen vieler Räume wird eine belastbare Einstellempfehlung statt einer Faustregel.



Bedarf des gesamten Verbunds

Gleichzeitigkeit, Lastspitzen, Grundlast: Wenn jeder Raum seinen Bedarf selbst kennt, ergibt die Summe ein Lastprofil, das nicht geschätzt, sondern gemessen ist. Das ist die Grundlage für Erzeugerauslegung und für die Frage, wie viel Leistung überhaupt gebraucht wird.



Hinweise auf das Gebäudeskelett

Räume, die auffällig lange aufheizen oder schnell auskühlen, zeigen Schwachstellen der **Gebäudehülle**. Ein Stockwerk, das systematisch gegen sein Nachbarstockwerk arbeitet, deutet auf ein Verteilungsproblem hin — genau so ist der Wärmestrom aus Teil I sichtbar geworden.



Hydraulik, Leitungen und Speicher

Ventilstellungsverteilung, Spreizung und Rücklauftemperatur über viele Räume machen hydraulische Unwuchten, überdimensionierte Stränge und Speicherpotenziale sichtbar — ohne zusätzliche Messtechnik und ohne dass jemand danach suchen muss.

Damit wird der Leitstand zur **Planungsgrundlage für die nächste Sanierungsstufe**: Hülle, Speicher, Leitungen und Hydraulik werden nicht mehr geschätzt, sondern aus dem laufenden Betrieb hergeleitet.

I FORSCHUNGSREISE

II ERKENNTNISSE

III DER SCHWARM

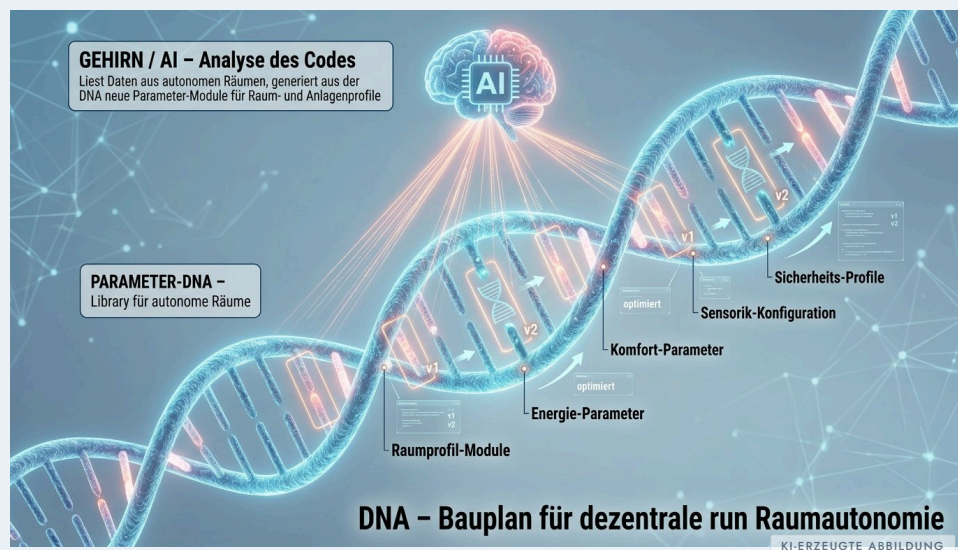
IV UMSETZUNG

V AUSBLICK

40 / 55

© MacPen GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

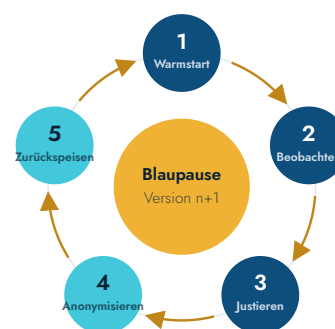
Die Blaupause ist der Bauplan, nicht der Befehl



Raumprofil, Energie- und Komfortparameter, Sensorikkonfiguration und Sicherheitsprofile liegen als versionierte Module vor. Die Analyse liest aus den Verläufen der autonomen Räume und schreibt daraus die nächste Version — v1, v2, v3. Jeder neue Raum startet auf dem Stand, den viele andere erarbeitet haben.

Lernen aus dem Schwarm, nicht aus dem einzelnen Raum

- Warmstart.** Der Raum wird einem Typ zugeordnet und übernimmt dessen Parametersatz.
- Beobachten.** Reale Belegung, reale Aufheizzeiten, reale Störgrößen dieses einen Raums.
- Nachjustieren.** Vorheizdauer, Nachlauf und Sollwertband verschieben sich auf den tatsächlichen Bedarf.
- Anonymisieren.** Nur Abgeleitetes verlässt den Raum. Keine Personen, keine Zeitreihen einzelner Nutzer.
- Zurückspeisen.** Was sich über viele Räume bewährt, wird zur nächsten Version der Blaupause — für alle.



blau: im Raum · cyan: über den Leitstand

Vier Konstruktionsprinzipien, die das tragfähig machen



Die Blaupause ist der Sicherheitsgurt

Selbstjustierung braucht einen definierten Startpunkt und feste Parametergrenzen. Führt die Beobachtung zu keinem belastbaren Ergebnis, gilt weiter die Blaupause. Damit ist ein lernendes System jederzeit prüfbar — und driftet nicht.



Zeit ist der beste Lehrer

Je länger ein Raum beobachtet wird, desto besser passt seine Parametrierung. Was in einem Gebäude Wochen braucht, liefert der Schwarm über viele Gebäude in derselben Zeit — jede neue Installation startet besser als die vorige.



Individuell heißt raumweise, nicht personenweise

In einem Raum mit vier Personen lassen sich vier Präferenzen nicht gleichzeitig erfüllen — aber vierzig Räume können vierzig verschiedene Profile fahren. Genau das löst die offene Frage aus Teil I: individuell werden, ohne das ganze Stockwerk zu heizen.



Intelligenz dezentral, Physik zentral

Teillastwirkungsgrad, Wärmerückgewinnung über Zonen, ein Wartungsort: Dort ist die Zentrale im Vorteil, und dort bleibt sie es. Die Aufteilung lautet deshalb **Intelligenz dezentralisieren, Physik dort zentralisieren, wo Skaleneffekte wirken** — und der Leitstand liefert ihr die Parameter dafür.

Teil IV Die Umsetzung

Wie aus dem Prinzip ein Gerät wird, das man montieren kann.

Der TEFFI-Weg - 4 Säulen

Säule I

Plug-in Installation
Keine Bauarbeiten
In Stunden installiert
Sofort betriebsbereit

Säule II

Modularer Ausbau
Raum für Raum
Etage für Etage
Skalierbar

Säule III

Autonomes System
Lernt selbstständig
Optimiert **automatisch**
Keine manuelle Eingriffe

Säule IV

Universelle Kompatibilität
Jedes Heizsystem
Jeder Gebäudetyp
Alt & Neu

© TEFFI GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

TEFFI - Der Raumkommandant

Übersetzer der Systeme: Verbindet Heizung, Kühlung, Licht & Sensorik – unabhängig von Hersteller oder Technik.

Standardisiert & offen: Baut auf EnOcean und schafft eine gemeinsame Sprache für alle Komponenten.

Autonom & effizient: Räume/Zonen regeln sich selbst optimal, ohne manuelles Eingreifen.

Skalierbar: Jeder Raum funktioniert eigenständig, wird aber Teil eines intelligenten, gebäudeweiten Netzwerks.



© TEFFI GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Funktionsweise TEFFI



Das **TEFFI-Gateway** empfängt Daten und steuert alle Raumelemente **ideal abgestimmt**.



TEFFI ist Universalübersetzer verschiedener Bussysteme. Daten werden ausschließlich über das **interne Netzwerk** versendet.



Zuordnung und Programmierung der Sensoren und Räume über **geschützte Identifikations-Systematik**.

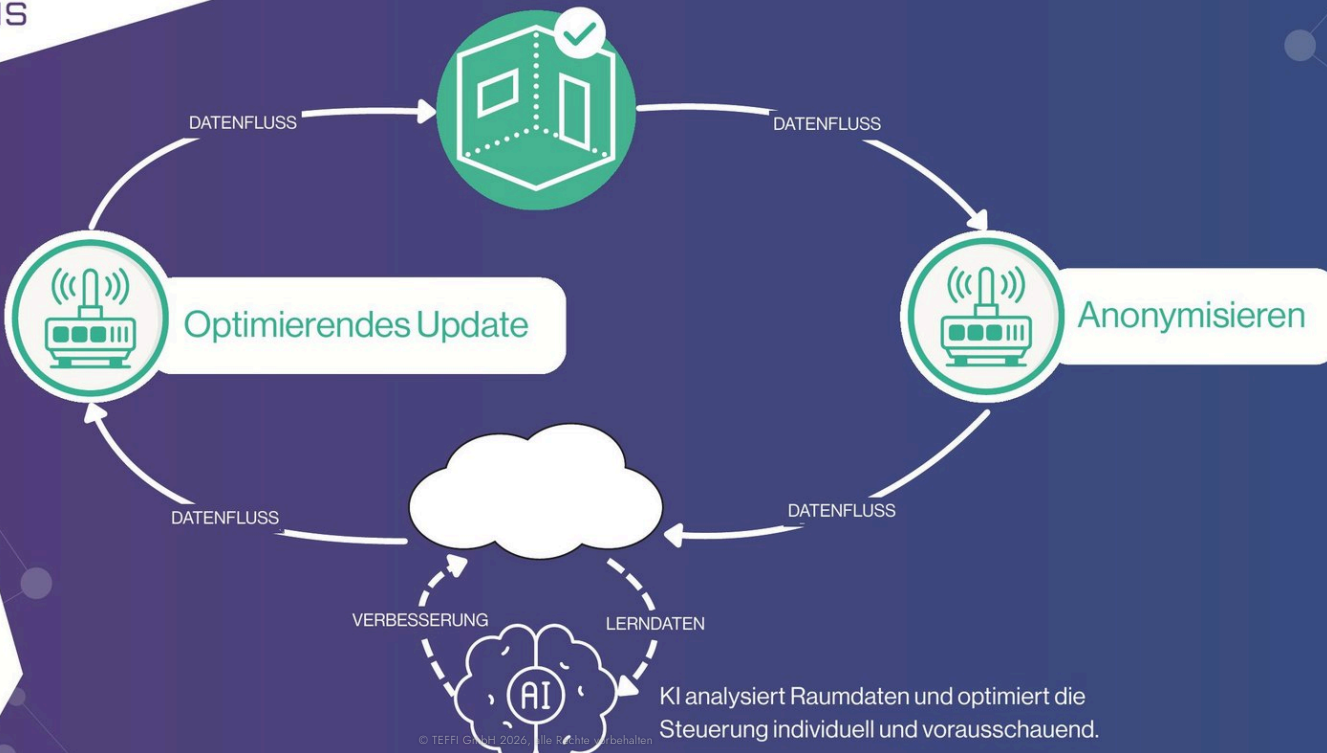


Effizient gesteuerter Raum durch **ideale Abstimmung** der Raumsysteme auf **individuellen Raumnutzungsbedarf**.

TEFFI integriert ein Betriebssystem direkt ins Gateway und vernetzt so alle Geräte zu einem smarten Raum

© TEFFI GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Stetig lernender Algorithmus



KI analysiert Raumdaten und optimiert die Steuerung individuell und vorausschauend.

© TEFFI GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

Transparenz bei Grundauslastungserkennung

Raum A (geplant)

Mo-Fr 8-18 Uhr = 50h/Woche

Einsparung

64%

Durch bedarfsgerechte Heizung

Was ist Grundauslastung?

Die Grundauslastung eines Raums beschreibt, wie oft und wie lange er tatsächlich genutzt wird - unabhängig von geplanten Nutzungszeiten.

Raum A (tatsächlich)

Durchschnittlich 18h/Woche genutzt

Zusatznutzen

Raumumwidmung möglich

Vorteile der Transparenz

- Realität statt Planung: Tatsächliche Nutzung oft anders als gedacht
- Potenzialidentifikation: Wenig genutzte Räume erkennbar
- Optimierungsgrundlage: Datenbasierte Regelanpassung
- Flächenmanagement: Nutzungsanalyse für Raumplanung

© TEFIT GmbH 2026, alle Rechte vorbehalten

KERNAUSSAGEN

Wichtigste Erkenntnisse

über 20 %

Einsparung beim
witterungsbereinigten
Wärmeverbrauch

bis zu 40 %

Reduktion bezogen auf die
Verbrauchsverhältnisse

Flinkheit

die
Reaktionsgeschwindigkeit
des Systems ist die
eigentliche Stellgröße

- Das Einsparpotenzial durch Präsenzabhängigkeit ist nachgewiesen. Der Einfluss der Anwesenheit auf den Wärmeverbrauch ist deutlich sichtbar.
- **Geschwindigkeit ist die Stellgröße.** Je flinker ein Raum auf den tatsächlichen Bedarf reagiert, desto kürzer die Betriebszeit bei gleichem Komfort. Komfort und Einsparung sind dann kein Zielkonflikt, sondern zwei Wirkungen derselben Größe — genau darauf deutet die Vorlauftemperatur-Variante mit 30 statt 90 Minuten Aufheizzeit.
- Transparenz über die tatsächliche Nutzung schafft Mehrwert über Energie hinaus.
- Komfort und Einsparung stehen bei einer Stockwerksstrategie im Konflikt. Die Auflösung liegt in der Raumebene — und in individueller Nachjustierung.

Weg von zentraler Planung und Kompromissen.

Hin zu dezentraler Optimierung jedes Raums nach tatsächlichem Bedarf — abgestimmt über die Physik, gelernt aus dem Schwarm.

-  **Lokaler Raumagent.** Regelt den Raum eigenständig auf den Informationen seines eigenen Systems.
-  **Kongruenz statt Verhandlung.** Gleiche Intelligenz, gleiche Bibliothek — deshalb kein Gegeneinander.
-  **Gemessene Einsparung.** Über 20 % beim Wärmeverbrauch, bis zu 40 % bei den Verbrauchsverhältnissen.
-  **Teilbare Investition.** Raum für Raum, Etage für Etage — der Aufwand skaliert mit der Fläche, und jede Stufe wirkt für sich.

Ausblick

Was als Nächstes kommt

Regelwerk, Netz und der konkrete nächste Schritt.

Die Regulatorik ist hier Rückenwind, nicht Hürde

REGELWERK	BEDEUTUNG
DIN EN ISO 52120-1	GA-Effizienzklassen. Klasse B verlangt Einzelraumregelung, bedarfsgeführte Lüftung und zentrale Überwachung mit Trenderausfassung.
DIN V 18599-11	Automatisierungsgrade; Grad B ist raumweise Optimierung mit kommunikationsfähigen Komponenten.
VDI 3813 Blatt 2/3	Raumatomsfunktionen, Funktionsmakros, Raumtypen — die normative Heimat der Blaupausen.
VDI 6041	Technisches Monitoring über den Lebenszyklus.
VDI 2067 Blatt 1	Gradtagzahlen — Grundlage unserer Witterungsberreinigung.
ISO/IEC 14543-3-10	EnOcean — interoperabel, nicht proprietär.

Die frühere Angabe „DIN EN 12831 ✓ erfüllt“ ist gestrichen — das ist ein Auslegungsverfahren für die Heizlast, das eine Regelung nicht erfüllen kann. Normtexte sind kostenpflichtig; Inhalte vor Veröffentlichung am Original verifizieren.

§ 71a GEG verlangt Nachweisbarkeit, nicht Zentralsteuerung

Für Nichtwohngebäude über 290 kW gefordert sind kontinuierliche Überwachung, Protokollierung und Analyse der Energieverbräuche, eine frei konfigurierbare Schnittstelle zu einem Energiemanagementsystem und ein benannter Verantwortlicher.

An keiner Stelle steht, wo der Sollwert berechnet wird. Der lesende Leitstand erfüllt die Datenausleitung besonders sauber.

Das Gebäude als Teilnehmer im Netz

☐ projiziert

Preissignal statt Befehl

Knappes wird bepreist statt zugeteilt. Jeder Raumagent entscheidet selbst, ob ihm die Wärme den Preis wert ist. Ein Skalar ersetzt ein Gesamtmodell.

☐ projiziert

§ 14a EnWG

Steuerbare Verbrauchseinrichtungen und Flexibilitätsvermarktung. Die Architektur ist dafür vorbereitet, belegt ist sie nicht.

☐ projiziert

Wärmepumpe statt Kessel

Am Testgebäude ist der Wechsel angestoßen. Damit kehrt sich der Vorlauftemperatur-Effekt womöglich um — das ist die spannendste offene Frage.

Diese drei Punkte verkaufe ich Ihnen heute nicht. Sie zeigen, wohin die Architektur trägt — gemessen ist davon nichts.

Allein – aber nicht isoliert.



1 · Messkonzept zuerst

Referenztage festlegen, Gradtagbereinigung vereinbaren, Komfortabfrage definieren. Wer erst hinterher misst, misst nichts Belastbares — und kann später nicht belegen, was die Maßnahme gebracht hat.



2 · Bis auf die Raumebene denken

Etagenweise installieren ist richtig. Aber die Strategie gehört in den Raum, nicht auf das Stockwerk — sonst wiederholen Sie den Komfortkonflikt aus dem Experiment.

Jeder Raum entscheidet selbst. Kein Raum entscheidet allein.

Anhang Für die Diskussion

Rohdaten, Befragung, offene Punkte und Quellen.

Witterungsbereinigte Wärmeverbräuche, alle Varianten

BEZEICHNUNG	REF 1	ERR 1	REF 2	ERR+	ERR+/60	ERR+/70	ERR 2
Vorlauftemperatur °C	50	50	50	50	60	70	50
Q OG 1 kWh/d	56,2	43,6	70,4	56,4	45,0	42,4	39,4
Q OG 2 kWh/d	50,1	47,9	69,2	51,8	36,0	30,3	29,3
Q OG 3 kWh/d	81,2	96,1	110,9	91,8	92,3	90,2	58,0
Q gesamt kWh/d	187,5	187,6	250,6	200,0	173,3	162,9	126,8
ΔQ OG 1	—	−22,4 %	+25,3 %	+0,4 %	−19,9 %	−24,6 %	−29,8 %
ΔQ OG 2	—	−4,3 %	+38,2 %	+3,4 %	−28,2 %	−39,5 %	−41,4 %
ΔQ OG 3 · Kontrolle	—	+18,3 %	+36,6 %	+13,0 %	+13,7 %	+11,1 %	−28,6 %
Summe aller Etagen (keine Einsparkennzahl)	—	+0,1 %	+33,6 %	+6,6 %	−7,6 %	−13,1 %	−32,4 %
Gradtagzahl Kd/d	15,2	15,5	15,5	16,6	14,4	11,7	9,2

EKUS hoch i, Aktionstag AG Intelligente Steuerung IER, 21.10.2025, Seite 39. OG 1 fuhr in ERR+ / ERR+/60 / ERR+/70 Aufheizzeiten von 90 / 60 / 30 Minuten. ERR 2 fiel in eine sehr milde Phase (GTZ 9,2) und ist nur eingeschränkt vergleichbar. **Wichtig:** Die Summe über alle Etagen ist keine Einsparkennzahl — OG 3 bleibt als Messinstrument absichtlich unregelt, wodurch ein Wärmestrom zwischen den Etagen entsteht. Die belastbaren Kennzahlen sind ΔQ je geregelter Etag und die Verbrauchsverhältnisse.

Die Befragung im Detail

Aufbau

- Drei geschlossene Fragen mit Emoji-Skala plus freies Kommentarfeld
- Gefühlte Raumtemperatur, Raumkomfort insgesamt, wahrgenommenes Wetter
- Bei negativer Komfortbewertung öffnet sich automatisch das Kommentarfeld
- Erinnerung täglich um 9 Uhr, verschiebbar auf 14 Uhr
- Bei Erstteilnahme zusätzlich Geschlecht, Alter und Selbstbeschreibung des Temperaturtyps

Stichprobe und Ergebnis

- 27.01. bis 15.03.2025, 35 Arbeitstage mit Heizbetrieb
- 32 von 46 möglichen Personen, 24 männlich, 6 weiblich, 2 ohne Angabe
- Alter 25 bis 65 Jahre, im Mittel 8,9 Antworten je Person (1 bis 32)
- Ø 24 Sekunden Zeitaufwand pro Befragung
- **Befund:** Die Bewertung derselben gemessenen Temperatur schwankt zwischen Personen stark — und bei einzelnen Personen auch zwischen Vormittag und Nachmittag

SZW25_EKUS_IGTE, Abschnitt 4. Weitere Einflussgrößen wie Tagesform, Tätigkeit und wahrgenommenes Wetter sind Gegenstand laufender Auswertungen.

Was wir selbst noch nicht wissen

Verteilverluste und Kesselnutzungsgrad

Gemessen wurde bei der Einspeisung in die Heizkreise. Die höheren Verluste und der schlechtere Nutzungsgrad bei 60 und 70 °C sind in den Zahlen **nicht enthalten**.

Einstrahlung

Die Bereinigung erfasst nur die Außentemperatur. Die Einstrahlung variierte zwischen 0,9 und 3,5 kWh/(m²·d) und beeinflusst besonders OG 3 stark.

Trennung der Einzeleffekte

Vorlauftemperatur und Aufheizzeit wurden gemeinsam variiert und die Vorlauftemperatur gilt immer für alle Etagen. Welcher Anteil worauf entfällt, ist offen.

Mehrjahresbeleg

Für die Dauerhaftigkeit fehlt uns der eigene Beleg über mehrere Heizperioden, idealerweise mit einer dokumentierten Nutzungsänderung im Beobachtungszeitraum.

Der Beitrag nennt die Quantifizierung der Einzeleffekte auf den Gesamtwärmeverbrauch selbst als Ziel weiterer Arbeiten.

Quellen

Primärquellen der Messdaten

Ullmann, J.; Helf, R.; Lierhammer, P.; Häbig, P.; Eltrop, L.; Leger, M.; Drück, H.; Hufendiek, K. (2025): Ergebnisse des Einsatzes intelligenter Technologien zur Verringerung des Wärmeverbrauchs eines Bürogebäudes. Symposium Zukunft Wärme, 20.–22. Mai 2025, Bad Staffelstein. DOI 10.18419/opus-17951

EKUS hoch i: Präsentation Aktionstag AG Intelligente Steuerung IER, 21.10.2025 — vollständige Ergebnistabelle, Seite 39

Reallabor CampUS hoch i: Projektabschlussbericht, August 2024. Universität Stuttgart, IER, ZIRIUS, IGTE, IWB, Green Office. Gefördert vom MWK Baden-Württemberg

HeatVentCon: Schlussbericht IGF-Vorhaben 01IF22051N, 30.06.2025. IGTE Universität Stuttgart und FG HLK Stuttgart

Ergänzend

Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Modul 2: Nutzendenverhalten — Einflussfaktoren und Einflussnahme auf die Gebäudeenergieperformance. Querauswertung der Projekte der Förderinitiative Energiewendebauen

Ballerini et al. (2008): Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance. PNAS 105(4):1232–1237

Regelwerke

GEG § 71a · § 14a EnWG · § 87 Abs. 1 Nr. 6 BetrVG · DSGVO Art. 35
DIN EN ISO 52120-1 · DIN V 18599-10 und -11 · DIN EN ISO 7730
VDI 3813 Blatt 2 und 3 · VDI 2067 Blatt 1 · VDI 6041 · ISO/IEC 14543-3-10
Hardware: Eltako FKS-SV, FBH55ESB, FMMS44SB. Praxispartner der Forschungsprojekte: Tecomon GmbH.